第 38 卷第 10 期 生 态 学 报 Vol.38,No.10
2018 年 5 月 ACTA ECOLOGICA SINICA May,2018

DOI: 10.5846/stxb201704060588
王录仓,陈菲.石羊河流域综合治理灌区水效率变化研究.生态学报,2018,38(10):3692-3704.
Wang L C,Chen F.Change in water-use efficiency of irrigated areas before and after integrated management in Shiyang River Basin.Acta Ecologica Sinica, 2018,38(10):3692-3704.

石羊河流域综合治理灌区水效率变化研究

王录仓*,陈 菲
西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要:石羊河流域灌区是人-地-水矛盾高度集结之地,也是流域综合治理的重点地区,其用水效率的高低深刻影响着绿洲的稳定性和三生系统(生产-生活-生态)的和谐发展状态。选择 DEA 模型,测度了《石羊河流域治理规划》实施前后 13 个灌区农业用水效率变化。结果表明:综合治理前后各灌区用水效率存在明显的时空差异,以 2007 年为拐点,总体呈现前期波动下降、后期稳定提升的发展历程。用水效率中游井泉灌区>中游山水灌区>下游山水井泉混合灌区,映射出流域治理的强大影响力。重点治理区域高于非重点区域,但下游红崖山水库灌区用水效率仍很低。各灌区水土冗余是影响用水效率的共性因素。水冗余井泉灌区<山水灌区,但冗余度和松弛变量均在减少,说明水资源节约程度在加强。治理前井泉灌区和混合灌区土冗余最多;治理后山水灌区和下游红崖山水库灌区土地在减少冗余度,说明"关井压田"对井泉灌区起到明显作用。

关键词:灌区;农业用水效率;DEA 模型;石羊河流域;综合治理

Change in water-use efficiency of irrigated areas before and after integrated management in Shiyang River Basin

WANG Lucang*,CHEN Fei
College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, *China*

Abstract: The Shiyang River Basin is one of three large continental river basins in Hexi Corridor and is the region facing the greatest pressure on water resources. The utilization efficiency of water resources not only affects sustainable socioeconomic development but also affects the ecological security of the country. The irrigated area is the largest water consumption area in an arid inland river basin and is also a highly controversial multiuse area; therefore, comprehensive watershed management is fundamental in this area. Water-use efficiency has a profound effect on oasis stability and harmonious socioecological and productive developments in such areas. The present study used the DEA model, and we measured the agricultural water efficiency and its influencing factors in 13 irrigated areas of the Shiyang River Basin during 2000—2010. The results showed obvious temporal and spatial differences in water-use efficiency in irrigated areas before and after integrated measures. The water-use efficiency fluctuation noted during the early stages of management became more stable by 2007. The water-use efficiency of the irrigated areas were as follows: W-S irrigated areas in the middle reaches (taking wells and springs as irrigated water sources) >R irrigated areas in the middle reaches (taking rivers as irrigated water sources) >R-W-S irrigated areas in downstream(taking rivers、wells and springs as irrigated water sources), reflecting the strong influence of the watershe comprehensive measures. The key control region showed higher water-use efficiency than the non-key areas, but that of the downstream Hongyashan Reservoir Irrigated Area was still very low. The irrigated areas had different degrees of water and land redundancies;The redundancy of water-use in the W-S irrigated areas are more than

基金项目:国家自然科学基金项目(41261042);国家社会科学基金项目(17BJY047)
收稿日期:2017-04-06; **网络出版日期**:2018-02-01

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: wanglc007@nwnu.edu.cn

the R irrigated areas, however, its redundancy and slack variables are decreasing, which indicates that the water resources conservation degree are strengthened after the integrated management. Before integrated management, the redundancy of irrigated land in the W-S irrigated areas and R-W-S irrigated areas were most; after, the redundancy were reduced, reflecting that "closing wells" and "compressing farmland" plays an obvious role.

Key Words: irrigated area; water-use efficiency; DEA model; Shiyang River Basin; integrated management

在我国,灌溉农田约占耕地的 50%,生产了 3/4 的粮食和大部分经济作物,但灌溉用水却消耗了 60%以上的用水量[1]。结构性缺水已成为制约国民经济持续发展的主要瓶颈,如何提高水资源利用效率,缓解用水紧张状况,优化用水结构,是国家面临的重大课题。

干旱区内陆河流域的核心在于水,核心区域在于绿洲。受山地-绿洲-荒漠景观格局的制约,水资源利用存在着上游产水区-中游利用区-下游散失区的空间分异。中下游绿洲是耗水最大的区域,也是人-地-水矛盾高度集结之地。灌区是指有可靠水源和引、输、配、排水渠道系统的灌溉区域,是构成干旱区绿洲的最基本单元,也是水资源利用最集中的地区。也可以说,正是具有复杂依赖关系的一个个灌区,经过空间整合后,才形成了现代绿洲[2]。其效率的高低不仅深刻影响着绿洲水资源的利用态势和稳定性,而且波及到全流域三生系统(生产-生活-生态)的和谐发展状态。

石羊河流域是河西三大内陆河流域之一,也是水资源开发利用程度最高、水压力最大用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的流域之一。流域内水资源消耗率达 109%,水资源开发利用程度高达 172%,远远超过水资源的合理承载能力。资源型缺水和结构型缺水叠加互制,导致流域生态环境日趋恶化:地下水位下降,湖泊消失,土地沙漠化、盐渍化进程加快,天然植被大面积枯萎死亡,危害程度和范围日益扩大,甚至形成"生态难民",这引起了国家的高度重视和社会各界的广泛关注。为了尽快遏制流域生态恶化的趋势,国家实施了石羊河流域综合治理工程,规划治理范围为除大靖河水系和古浪县引黄灌区以外的石羊河流域,以 2003 年为现状水平年,2010 年为规划重点目标年,总体目标是提高水资源利用效率和效益。自流域综合治理以来,生态环境得到了较好的修复,水资源利用效率得到了提高,节水型社会初见成效。

2003 年石羊河流域治理之前,全流域国民经济各行业总用水量 $28.77\times10^8 m^3$,其中农田灌溉用水比例高达 86%,工业用水比例仅 5.4%,全流域单方水 GDP 仅为 4.81 元,是全国平均水平的约 1/5,水资源利用效率非常低下。论文选择石羊河流域中下游绿洲灌区,一方面是由于灌区依托的水源不同、区位不同、承载力不同,因此各灌区水资源利用效率也存在着时空差异;另一方面,将其纳入国家行为平台,判识流域综合治理前后对效率产生的影响。

水资源利用效率是刻画水资源有效开发利用和管理水平的综合指标。Kopp[3]认为,在其他投入要素及技术水平不变的条件下,最小灌溉用水量与实际用水量的比值即为水资源利用效率。根据要素的多寡,水资源效率的评价要素可以分为单要素水资源效率(Partial Factor Water Efficiency, PFWE)和全要素水资源效率(Total Factor Water Efficiency, TFWE)。PFWE 可利用水资源消耗系数间接表征,如万元 GDP 用水量、农业灌溉均用水量等[4],计算简便、结果明了,但忽略了水资源与其他要素投入的替代,因此具有较大的局限[5],而 TFWE 则在测算过程中考虑了其他要素的投入[6],因此其运算结果更能说明问题。干旱区由于水资源匮乏,因此水效率广受国内外学者关注[7-13],不少学者围绕农业资源高效利用,开展了农业水资源利用效率评估[14-22],灌区是水资源利用大户,水效率的高低决定了粮食安全和生态安全,因此也是学者致力研究的重要方面[23-25]。在国内不少学者除了从宏观角度研究灌区水资源利用效率外[26-30],甚至从灌区作物耗水角度,测评水资源利用效率[31-34],Liu 测算了河套灌溉区玉米产量在覆盖条件下滴灌水利用效率[35],Wang 讨论了不同灌溉水平下,水利用效率对槿生产功能的影响[36],Li 揭示了中国玉米带优化单一灌溉、实现高玉米产量和水分利用效率的机理[37],Ali 发现不同缺水灌溉策略对半干旱条件下小麦产量、质量和水分利用效率的影

响[38]。上述研究大多从时间序列描述了水效率的变化情况,很少将时间序列与国家具体政策实施节点相结合后对其水效率变化作以研究。本文深入挖掘用水效率与相关政策实施节点、针对性区域以及实施力度之间的关系。从而可以使人们对流域相关政策制定的科学性和实施的效果有一个直观评价,并对今后制定新的灌区水效率的提高方案具有重要的参考价值。

1 研究区概况

石羊河流域是典型干旱区内陆河流域,位于甘肃省河西走廊东部,乌稍岭以西,祁连山北麓,位于 101°41′—104°16′E,36°29′—39°27′N,总面积 4.16×10^4 km^2。石羊河流域内各支流自东向西可分为大靖河水系、六河水系(古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河)和西大河水系,形成 3 个相对独立的内陆河水系。其中大靖河水系隶属大靖盆地,其河流水量在本盆地内转化利用;六河水系隶属于武威南盆地,河水出山口后基本上全部被水库栏蓄,然后引水入渠进行灌溉,在武威南盆地内利用转化,并在盆地边缘汇成石羊河,进入下游红崖山水库,灌溉民勤灌区;西大河水系上游主要由西大河组成,隶属永昌盆地,其水量在该盆地内利用转化后,汇入金川峡水库,进入金川昌宁盆地,在该盆地内全部被消耗利用。因此全流域形成西大河山水灌区、六河中游山水灌区(西营、金塔、杂木、安远、古丰、张义)、六河中游井泉灌区(永昌、金羊、环河、清源、黄羊、古浪)、大靖河山水灌区和红崖山水库灌区(图 1、表 1)。

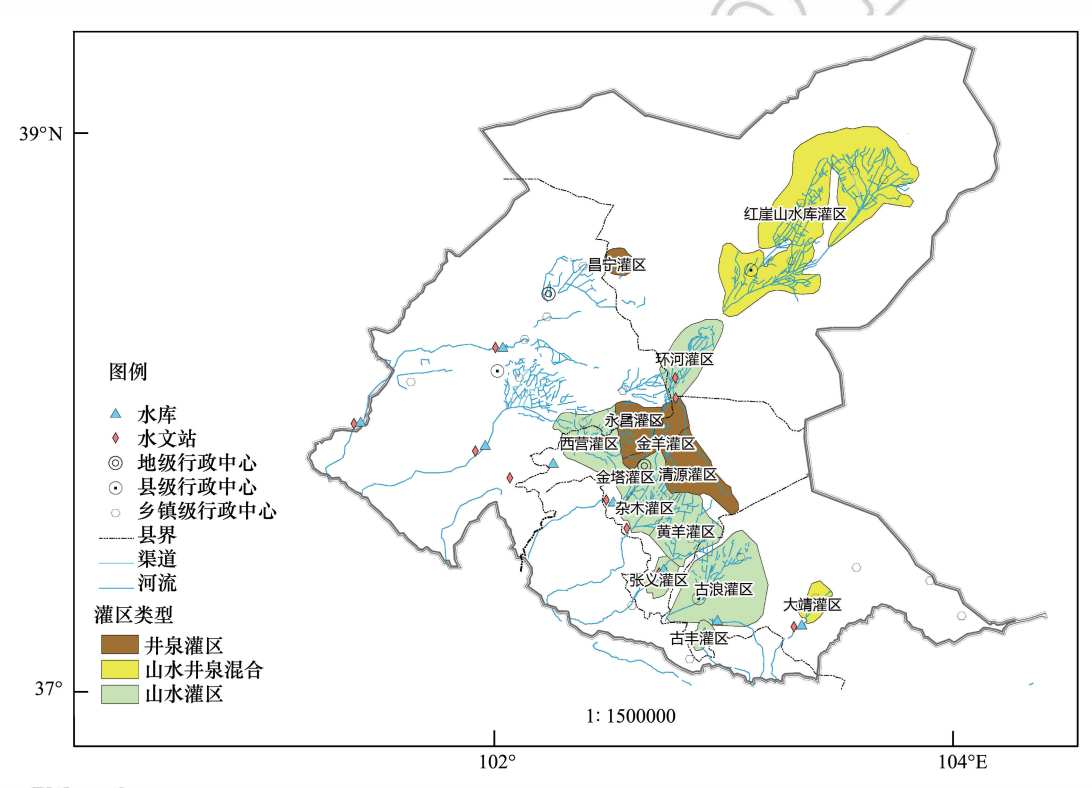


图 1 武威灌区类型图

Fig.1 Type map of irrigation areas in Wuwei irrigation area

石羊河流域现有水地面积 30×10^4 hm^2,农业总用水量 24.34×10^8 m^3,占总用水量的 85.7%。流域内耗水总量已超过水资源总量,水资源消耗率达 109%,水资源开发利用程度高达 172%,远远超过水资源的承载能力。整个流域包括武威、金昌两市,其中武威市是石羊河流域经济、政治、社会发展的重点区域,人口占全流域的 78.4%,灌溉面积占 70%,GDP 占 61%,粮食总产量占 80%。因金昌市隶属西大河水系,且以工业生产为主,与武威市存在着巨大差异。而武威市所辖灌区是石羊河流域人口最集中、水资源使用程度最高、供需矛盾最突出的地区,所以论文以武威市所辖区灌区为案例区,在具体的研究过程中,又将天祝县所辖的安远、金强、

松山、朱岔灌区剔除(非流域综合治理区域)。

表 1 石羊河流域(武威市)各灌区基本情况

Table 1 Basic situation of each irrigation district in Shiyang River Basin (Wuwei)

灌区类型 Irrigation area type	灌区名称 Name of irrigation area	隶属行政区 Administrative Region	水源名称 Name of water source	年灌溉引(提)水量 Annual irrigation diversion quantity/ $10^4 m^3$	年均毛用水量 Annual gross water use per/ $(666.67m^3/m^3)$	设计灌溉面积 Design irrigated area/ $10^3 hm^2$
山水灌区	西营灌区	凉州区	西营河	27608	747	27.45
R-irrigated area *	杂木灌区		杂木河	24305	787	21.73
	黄羊灌区		黄羊河	10649	400	16.23
	金塔灌区		金塔河	11547	834	9.37
	张义灌区		黄羊河	1920	820	1.88
	古丰灌区	古浪县	古浪河	705	376	2
	古浪灌区		古浪河	5692	331	16.67
井泉灌区	永昌灌区	凉州区	机井	9913	739	9.1
W-S irrigated area **	清源灌区		机井	8107	813	6.65
	金羊灌区		机井	6760	718	6.29
	环河灌区	民勤县	石羊河(机井)	3200	843	2.53
	昌宁灌区		机井	3600	1142	2.1
山水井泉混合灌区	红崖山水库灌区	民勤县	石羊河	67120	882	60
R-W-S irrigated areas ***	大靖灌区	古浪县	大靖河	788	336	10

R irrigated area * :taking rivers as irrigated water sources;W-S irrigated area * * :taking wells and springs as irrigated water sources;R-W-S irrigated areas * * * :taking rivers、wells and springs as irrigated water sources

2 研究方法与数据来源

水资源效率评价可以分为单要素水资源效率(PFWE)和全要素水资源效率(TFWE)。PFWE 主要利用水资源消耗系数间接表征,如农业灌溉均用水量等,计算较为简便,但忽略了水资源与其他要素投入的替代作用,具有较大的局限;TFWE 则考虑了其他要素对产出的贡献。在 TFWE 框架中,水效率的测度主要有两种方法:随机前沿分析(SFA)和数据包络分析(DEA)。本文使用 DEA 来测算灌区的水效率。

DEA 是以"相对效率"概念为基础,根据多要素投入和多要素产出对同类决策单元(如灌区)进行相对有效性或效益评价的一种系统分析方法。假设决策单元(如灌区)为固定规模收益(如粮食产量等)时,可利用 CCR 模型计算水资源利用的纯技术效率(VRETE)。该效率的高低主要受灌区管理水平和引水、配水技术等因的素影响,VRETE 都应≤1,越靠近 1,效率越高,VRETE = 1 时,表明该灌区在现有灌溉技术条件下水资源利用是有效的。当灌区规模收益可变时,可将 CCR 模型拓展为 BCC 模型,计算灌区的规模效率(SCALE),并且得到规模报酬:规模报酬不变表示处于效率前沿线上,规模报酬递增表明有可能再适当增加投入(如农业灌溉用水量等)后获得更大比例的产出,规模报酬递减则意味着在增加投入后,产出的增长比可能小于投入的增加比。综合效率(CRSTE)是灌区的资源配置能力和资源使用效率的综合体现,由纯技术效率和规模效率可以得到。即:CRSTE = VRETE×SCALE。

在全要素框架下,灌区全要素水资源效率(TFWE)可以定义为用水量的目标值与实际值的比值,由此可以确定各灌区的松弛变量和冗余率。松弛变量衡量各个投入变量距离其线性最优的差异,其值越大,代表其影响配置效率的程度越大。冗余率越大则水资源综合效率越低,说明提升潜力越大。

在 DEA 模型中,关键是确定"投入"和"产出"变量。水是绿洲灌区的命脉,是最根本性的投入要素,是一切产出的根源。土地是农业生产的基础和载体,水和其他投入要素只有依附在土地上才能实现农业生产。灌

区中,90%以上的水用于农田灌溉,而农田的绝大部分主要用来种植粮食。因此土地可视为农业生产的固定投入要素,水资源等可视为可变投入要素。灌区水资源利用效率的高低,主要取决于是否有充足、可靠的水资源,即水资源(地表水和地下水)的丰度和用水情况是效率的控制性因素,但水资源是否能用来灌溉,还限决于是否有配套的引水、输水、配水工程系统,也就是说“引水量”、“干支渠长度、密度”等因素同样决定着效率的高低;除此以外,灌区的管理水平对效率的高低也起着重要的作用。本文选取各灌区的灌溉用水量、农业用水量、渠系配套水平(长度、密度等)、土地利用系数作为主导投入要素,将“水协管理户数”作为辅助投入要素;将实际灌溉面积、粮食产量、“水协管理受益农户数”等做为产出要素(表 2)。

表 2　石羊河流域各灌区变量基本情况

Table 2　Basic situation of variables of irrigated areas in Shiyang River Basin

变量 Variable	变量符号 Wariable symbol	均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient
农业用水量/($10^4 m^3$) Agricultural water consumption	W	614.48	347.63	0.566
水协管理户数/(户) Number of households managed by Water-user Association	P	2977.53	4218.96	1.417
渠系密度/(km/km^2) Density of irrigated canal	C	30.75	27.72	0.901
粮食产量/($10^3 kg$) Grain yield	F	6219.40	1201.70	0.193
受益农户数/户 Number of benefiting farmers	P′	3263.49	3991.70	1.223

来源:《武威市水利统计年报》(2000—2010 年)[39]

由表 2 可以得知,所有变量均存在明显的差异,说明不同灌区发展状况存在着空间非均衡性。但各变量之间存在较强的正相关性(表 3),尤其是农业灌溉水量与粮食总产量之间的相关系数高达 0.8625,表明水资源在灌区农业生产中发挥着决定性的作用。10 年间,灌区粮食产量大致相当,因此可以用粮食总产进行评估。

表 3　各变量相关系数矩阵

Table 3　Correlation matrix of each variable

变量 Variable	农业用水量 Agricultural water consumption	水协管理户数 Number of households managed by Water-user Association	渠系密度 Density of irrigated canal	粮食产量 Grain yield	受益农户数 Number of benefiting farmers
农业用水量 Agricultural water consumption	1.0000				
水协管理户数 Number of households managed by Water-user Association	0.0907	1.0000			
渠系密度 Density of irrigated canal	0.5981	0.0886	1.0000		
粮食产量 Grain yield	0.8625	0.7461	0.4361	1.0000	
受益农户数 Number of benefiting farmers	0.0034	0.9817	0.1171	0.3350	1.0000

数据主要来源于石羊河流域《武威市水利统计年报》,部分补充数据来源于寒区旱区科学数据中心的数据库

3　结果分析

3.1　综合治理前后用水效率存在明显的时空差异

选择投入导向型 DEA 模型,测度 2000—2010 年石羊河流域 13 个灌区水资源技术效率和规模效率(表 4、

图 2）。

（1）纯技术效率是灌区管理水平和技术等带来的效率。13 个灌区的纯技术效率均值为 0.8101。三大类灌区中，井泉灌区效率最高，下游山水井泉混合灌区最差。从时序变化看，中游山水灌区和井泉灌区均在提升，尤其是 2006 年后提升更快；但下游混合灌区却处在持续下滑的状态，直到 2007 年流域治理规划实施后，才有较大的提升。

（2）规模效率体现了现有规模与最优规模之间的差异。13 个灌区平均规模效率为 0.9375，其中有 4 个达到 1，其余灌区基本在 9 左右变化，最低是古浪灌区（0.8837）。从规模效率的空间分异看，同样存在井泉灌区高于山水灌区的态势，其中黄羊、金塔、古浪、古丰等中游山水灌区明显低于其他各灌区。从规模报酬的角度进一步考察，绝大多数灌区又处在效率前沿上，红崖山水库灌区和黄羊灌区规模报酬递减，这意味着需要大量减少用水。从时序变化看，2005 年、2008 年和 2010 年，下游山水井泉混合灌区效率均出现明显的剧变，说明流域治理对下游的影响最深刻。

（3）从全要素水效率来考察，基本以 2003 年为界，之前持续走低，之后持续上升；中游山水灌区和井泉灌区效率的波动性不大，且流域治理规划实施后明显上升，但下游混合灌区却表现出明显的起伏不定性。治理之前山水灌区>井泉灌区>混合灌区；之后井泉灌区>山水灌区>混合灌区，说明中游灌区对治理的响应更明显。

表 4　石羊河流域灌区 DEA 效率

Table 4　Efficiency of DEA in Shiyang River Basin

年份 Year	山水灌区 R-irrigated area			井泉灌区 W-S irrigated area			山水井泉混合灌区 R-W-S irrigated area		
	CCR	BCC	TFWE	CCR	BCC	TFWE	CCR	BCC	TFWE
2000	0.8058	0.934	0.7586	0.8274	0.9588	0.6637	0.6514	1	0.4472
2001	0.675	0.8732	0.6464	0.7534	0.9273	0.6055	0.4554	1	0.2634
2002	0.8123	0.9597	0.7449	0.8221	0.947	0.5907	0.5218	1	0.2958
2003	0.6564	0.9073	0.3918	0.8023	0.9541	0.5427	0.3967	0.8701	0.1914
2004	0.821	0.941	0.821	0.9278	0.9317	0.9278	0.4559	1	0.4559
2005	0.9015	0.9733	0.8505	0.9672	0.9682	0.9672	0.4443	0.4599	0.4443
2006	0.7447	0.9085	0.7444	0.8712	0.9006	0.8642	0.3784	0.9516	0.3354
2007	0.8244	0.9572	0.8244	0.9663	0.9688	0.9663	0.3849	1	0.3849
2008	0.8639	0.9776	0.8639	0.9273	0.981	0.7967	0.328	0.5184	0.328
2009	0.829	0.9373	0.7941	0.9755	0.9764	0.9755	0.5045	1	0.4586
2010	0.9015	0.9733	0.8505	0.9672	0.9682	0.9672	0.4443	0.4599	0.4443

CCR：纯技术效率，Purely technological efficiency；BCC：规模效率，Scale efficiency；TFWE：全要素用水效率，Total factor water-use efficiency

鉴于石羊河流域严重的生态、经济、社会问题，2000 年甘肃省组织流域治理规划编制，2003 年，率先启动实施民勤湖区综合治理，2007 年国务院正式批复《石羊河流域重点治理规划》。规划治理范围为除大靖河水系和古浪县引黄灌区以外的石羊河流域，以 2003 年为现状水平年，2010 年和 2020 年为规划水平年，其中 2010 水平年为规划重点。总体目标为保障生活和基本生态用水，满足工业用水，调整农业用水，提高水资源利用效率和效益。主要采取节水型社会建设、产业结构调整、保障水资源配置、实施生态移民等措施。

回溯 2010 年以来各灌区用水效率的变化，就会发现：综合治理前后，用水效率存在明显差异，这与《石羊河流域重点治理规划》实施时间节点高度切合，且有一定的时滞效应。综合治理前（2000—2003 年间），用水效率下降；治理后基本呈现波动上升态势。几乎所有灌区的用水效率在 2003 年“探底”，此后才逐年递增，并在 2005 年达到新高。2000 年，13 个灌区中，仅有 3 个灌区达到有效；2003 年实施“民勤湖区综合治理工程”，红崖山水库灌区的用水效率出现了立杆见影的变化，由 2003 年的 0.1914 上升为 2004 年的 0.4559。但其他各灌区水效率均呈下降态势，表现为典型的治理前“突击用水”特征。2005 年，甘肃省政府批准下发了流域水资

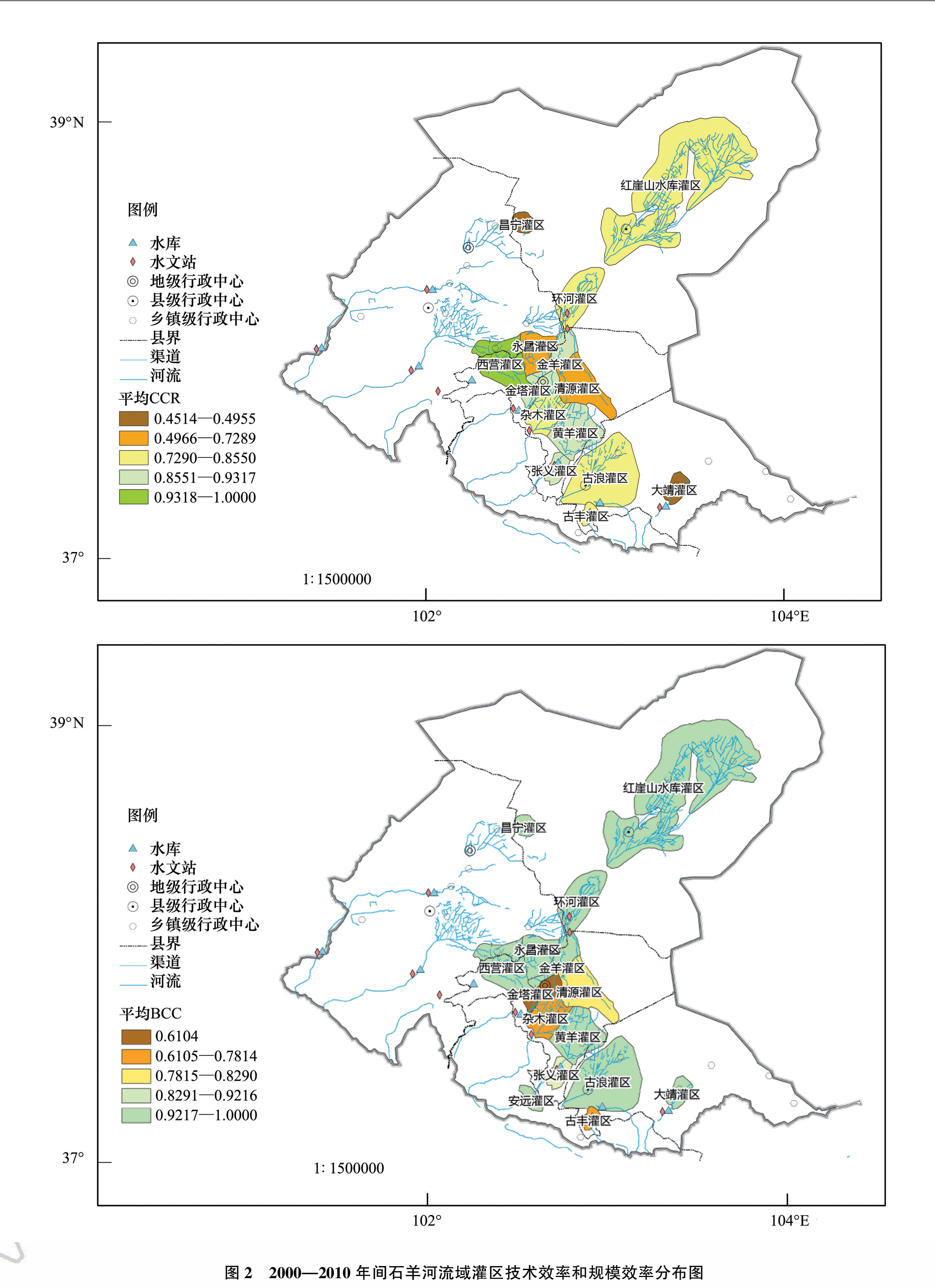


图 2 2000—2010 年间石羊河流域灌区技术效率和规模效率分布图

Fig.2 Distribution of CCR and BCC of irrigation area in Shiyang River Basin(2000—2010)

CCR:纯技术效率,Purely technological efficiency; BCC:规模效率,Scale efficiency;TFWE:全要素用水效率,Total factor water-use efficiency

源分配方案,启动流域管理条例立法工作。武威市出台了《石羊河流域水资源管理条例》,制订了《石羊河流域水资源分配方案及水量调度实施计划》、《石羊河流域地表水量调度管理办法》等规范性文件,建立了流域地表水量调度和地下水削减开采量制度,各灌区年灌溉引(提)水量大幅度下降,尤其是下游的红崖山水库灌

区下降最明显。有效遏制了水资源大量浪费的现象,用水效率有所提高。13 个灌区中,已有 6 个灌区达到有效。2007 年国务院正式批复《石羊河流域重点治理规划》,甘肃省人大通过了《石羊河流域水资源管理条例》,武威市正式颁布《武威市 2008—2010 年关闭部分农业灌溉机井规划》和《武威市 2008—2010 年农业灌溉面积压减规划》。武威市计划到 2010 年关闭灌溉机井 3300 眼(其中民勤县 3000 眼,凉州区 250 眼、古浪县 50 眼)、压缩灌溉面积 $3.2\times10^4 hm^2$(其中民勤县 $2.0\times10^4 hm^2$、凉州区 $1.2\times10^4 hm^2$),尤其是与民勤生态关系最密切的西营、杂木、环河、红崖山等灌区更要大幅度“关井压田”。同时节水灌溉面积有较大的增加,2005 年以前,各灌区尚无工程节水灌溉面积,2006 年以后,节水面积大幅度增加,尤其是流域治理的重点灌区——西营、杂木、红崖山节水面积最大,分别增加到 2010 年的 2.299×10^4 hm^2、1.953×10^4 hm^2 和 2.718×10^4 hm^2。2005 之前,普遍实行大水漫灌,2007 年开始,实行灌溉定额,从年均毛用水量可以看出,2007—2010 年间,持续走低。从灌区固定渠系水利用系数看,则表现为持续提高,尤其是流域治理的重点灌区(西营、杂木、红崖山、环河)提升更快。

由此可见,治理力度和年限与灌区用水效率之间存在着很强的关联性,治理力度越大,用水效率越高,稳定性和持续性也越强(表 5)。

表 5　石羊河流域综合治理进程与水效率变化特征

Table 5　Process of integrated management and characteristics of water-use efficiency in Shiyang River Basin

年份 Year	主要行动 Major action	用水方式和效率变化 Change of water use mode and efficiency
2003	率先启动实施民勤湖区综合治理	传统用水方式延续,下游民勤山水井泉混合灌区用水效率有明显地回升
2005	甘肃省政府批准下发了流域水资源分配方案,流域地表水量管理办法、流域水事协调规约等规范性文件,并实行了流域地表水量高度和地下水削减开采量地方行政首长责任制,启动流域管理条例立法工作。	传统用水方式受到抑制,中游山水灌区必须向下游放水,用水量受到限制,用水效率有大幅度提升
2006	甘肃省政府开始对民调水价进行补贴。	财政补贴的实施一定程度上刺激了下游山水井泉混合灌区的用水量,导致用水效率反而下降
2007	2007 年国务院正式批复《石羊河流域重点治理规划》,甘肃省人大通过了《石羊河流域水资源管理条例》,普遍实施“水票制”	国家行为强力介入、法律约束力真正显现。井泉灌区实施大面积关井压田,水票制将用水户切身利益关联起来,水效率明显提升

3.2　重点治理区域与非重点区域差异明显

流域综合治理范围为除大靖河水系和古浪县引黄灌区以外的石羊河流域,其中 2006—2010 年优先安排六河水系灌区(西营、杂木、金塔、清源、环河、金羊、永昌、红崖山)节水改造工程,2010—2020 年实施黄羊、古浪、清河灌区节水改造。

流域治理的重中之重是红崖山水库灌区和环河灌区。其中红崖山水库灌区 2000—2007 年间,用水效率持续走低,直到国务院正式批复《石羊河流域重点治理规划》后,用水效率才开始提升,但提升的幅度和速度远低于其他两类灌区。也就是说,由于下游积淀的问题太多,包袱太沉重,解决问题的难度更大。相比较而言,环河灌区受井泉灌区特性的影响,且专门制定了《环河灌区水资源管理责任制》,从 2004 年起,用水效率一直稳定在有效状态。中游山水灌区尽管也是综合治理区,但由于位于各河上游,在用水上具有“近水楼台先得月”的便利,水压力较小,因此用水效率提升并不明显。这可以从节水灌区面积的变化看出端倪,2006—2010 年间,流域重点治理的红崖山水库灌区年均节水灌溉面积达 2.718×10^4 hm^2,中游清源灌区为 0.828×10^4 hm^2,环河灌区为 0.246×10^4 hm^2,高于非重点治理灌区,与此同时,灌溉定额有所下降:尤其是红崖山水库灌区年均毛用水量由 2007 年 714 m^3下降到 2010 年的 493 m^3,是所有灌区中下降最显著的,但由于灌区固定渠系水利用系数在各灌区中最低(2010 年仅有 50%),所以用水效率仍然较低。

3.3　水土资源浪费是影响水效率的共性因素

(1)水冗余情况

当生产效率为非 DEA 有效时,表明投入转化为产出的能力有限,至少 1 项投入要素存在冗余,即存在松弛变量。利用 CCR 模型求得 2000 年和 2010 年各 DEA 非有效的灌区转变为有效 DMU 时用水量的松弛变量,并计算冗余率(表 6)。2000 年 15 个灌区中,TFWE=1 的灌区有永昌、金羊、昌宁和红崖山水库灌区,几乎均为井泉灌区,相比而言,西营、杂木、金塔、清源等山水灌区均存在不同程度的用水冗余,其中最少的为古浪灌区(39.24×10^4 m^3),最大为金塔灌区(830.84×10^4 m^3)。环河灌区的冗余率最小(8.11%),金塔灌区最大(54.62%),说明在当前产出条件下,如果该灌区生产效率达到 DEA 有效灌区水平,至少可减少 1/2 的灌溉用水量。灌溉用水的冗余率介于 8%—55%,说明不同灌区间灌溉水资源浪费情况差异较大,这与各灌区水资源丰度、灌溉制度密切相关,也与灌区灌溉设施的配套程度、管理水平相关。2010 年,TFWE=1 的灌区数量明显增加,个别山水灌区如张义、金羊也达到有效,整个灌区的平均灌溉用水量的冗余率降低了一半之多,平均 TFWE 更是从 0.8327 增至 0.9121。

表 6 2000 年和 2010 年石羊河流域灌区的灌溉水冗余情况变化

Table 6 Change of redundancy of irrigated water of irrigated areas in Shiyang River Basin (2000 and 2010)

灌区类型 Irrigated area type	灌区名称 Name of irrigated area	2000			2010		
		松弛变量 Slack variable/ 10^4m^3	冗余率/% Redundancy rate	TFWE	松弛变量 Slack variable/ 10^4m^3	冗余率/% Redundancy rate	TFWE
山水灌区	西营灌区	407.15	31.61	0.6839	3.08	0.44	0.9956
R-irrigated area	杂木灌区	459.6	37.80	0.622	171.95	28.79	0.7121
	黄羊灌区	104.67	11.78	0.8822	100.15	13.21	0.8679
	金塔灌区	830.84	54.62	0.4538	308.54	34.36	0.6564
	张义灌区	293.97	24.21	0.7579	0	0.00	1
	古浪灌区	39.24	13.14	0.8686	44.62	14.72	0.8528
	古丰灌区	135.48	37.07	0.6293	85.76	27.48	0.7252
井泉灌区	永昌灌区	0	0.00	1	0	0.00	1
W-S irrigated area	清源灌区	295.26	32.68	0.6732	89.83	12.92	0.8708
	金羊灌区	0	0.00	1	0	0.00	1
	环河灌区	77.47	8.11	0.9189	0	0.00	1
	昌宁灌区	0	0.00	1	0	0.00	1
山水井泉混合灌区	红崖山水库灌区	0	0.00	1	0	0.00	1
R-W-S irrigated area	均值	203.36	19.3092	0.8069	61.8408	10.1477	0.8985

原因是井泉灌区均位于各河下游,其水源均来自于地下水,水量的多寡深受上游用水的制约;相对而言,山水灌区的水源均来自于地表径流。六河水系经出口后进入武威盆地,每条河流出山口均对应一个山水灌区,由于天然河道渗漏严重,地表径流基本在各灌区被消耗和转化,除灌溉消耗外,多余的水资源通过河流、渠系和田间入渗补给地下水,供给武威盆地北部的井泉灌区。水资源在武威盆地利用转化后经过蔡旗断面进入红崖山水库,作为下游民勤盆地(红崖山水库灌区和环河灌区)的水资源。正由于石羊河特殊的水文单元和灌区的分布位置,因此用水受限的情况存在着明显的空间分异,总体来看,井泉灌区强于山水灌区,因此水冗余主要出现在六河中游山水灌区。

2000 年各灌区冗余率相差并不大,但到 2010 年变化较大。2000 年除永昌、金羊、昌宁和红崖山水库灌区外,其余灌区均存在不同程度的用水冗余率,其中金塔(54.62%)、杂木(37.80%)、古丰、清源等灌区冗余率最高,到 2010 年这些灌区的冗余率均有下降,说明水资源节约成效在逐步提高。2000 年与 2010 年相比,TFWE 均有不同程度的提高,而冗余度和松弛变量均在减少,说明水资源的效率在提升,水资源节约程度在加强。

(2)土冗余情况

土地是农业生产的基础和载体,水资源的投入只有依附在土地上才能体现其价值。利用 CCR 模型求得

的 2000 年和 2010 年各 DEA 非有效灌区转变为有效 DMU 时土地利用的松弛变量,并得到土地利用冗余率(表 7)。2000 年 15 个灌区中的 12 个存在不同程度的土地利用过量,其中冗余率最小的为西营灌区(2.56%),最大为昌宁灌区(48.05%),说明在当前产出的条件下,如果该灌区生产效率达到 DEA 有效水平,就可以节约近 2/3 的灌溉用地。土地的冗余率介于 2%—50%,说明不同灌区间土地资源浪费情况差异较大,中游的井泉灌区(如昌宁、环河灌区)、下游的混合灌区(红崖山水库灌区)土地冗余率相对较高。

与 2000 年比较,2010 年除红崖山水库灌区、金羊灌区不降反升外,其余各灌区冗余率均下降,尤其是尤其是中游山水灌区和下游井泉灌区(环河、昌宁灌区)下降最明显。说明在水资源配置减少后,红崖山水库灌区土地冗余更突出。

表 7　2000 年和 2010 年石羊河流域灌区的灌溉面积冗余情况变化

Table 7　Change of redundancy on land of irrigated areas in Shiyang River Basin (2000 and 2010)

灌区类型 Irrigated area type	灌区名称 Name of Irrigated area	2000 年 实灌面积 Actual irrigated area/ $10^3 hm^2$	2000 年 目标灌溉面积 Target irrigated area/ $10^3 hm^2$	2000 年 冗余率 Redundancy rate/%	2010 年 实灌面积 Actual irrigated area/ $10^3 hm^2$	2010 年 目标灌溉面积 Target irrigated area/ $10^3 hm^2$	2010 年 冗余率 Redundancy rate/%
山水灌区	西营灌区	25.82	25.16	2.56	21.82	21.82	0.00
R-irrigated area	杂木灌区	19.94	15.82	20.67	21.73	19.29	11.23
	黄羊灌区	16.23	16.23	0.00	13.57	12.12	10.68
	金塔灌区	9.28	7.07	23.78	8.89	7.47	15.95
	张义灌区	1.96	1.19	39.37	1.68	1.46	13.03
	古浪灌区	14.09	9.72	30.99	10.93	10.93	0.00
	古丰灌区	1.38	1.06	22.95	1.34	1.10	18.08
井泉灌区	永昌灌区	9.29	9.29	0.00	10.24	10.24	0.00
W-S irrigated area	清源灌区	9.92	7.78	21.61	13.00	13.00	0.00
	金羊灌区	6.73	6.73	0.00	9.18	7.67	16.42
	环河灌区	2.53	2.11	16.62	2.53	2.53	0.00
	昌宁灌区	2.00	1.04	48.05	1.85	1.85	0.00
山水井泉混合灌区	红崖山水库灌区	38.04	24.78	34.86	37.46	16.64	55.57
R-W-S irrigated area	均值	12.0931	9.8446	20.1123	11.8631	9.7015	10.8431

4　结论与建议

论文基于 DEA 模型,以石羊河流域 13 个灌区为例,考察了流域综合治理前后农业用水效率的变化及其空间分异。结果表明:综合治理前后各灌区用水效率存在明显的时空差异,以 2005 年为拐点,总体呈现前期波动、后期稳定提升的发展历程,中游井泉灌区>中游山水灌区>下游山水-井泉混合灌区,映射出流域治理的强大影响力。重点治理区域用水效率高于非重点治理区,但下游红崖山水库灌区用水效率仍很低。各灌区均存在不同程度的水土资源浪费现象,水冗余井泉灌区<山水灌区,但冗余度和松弛变量均在减少,说明水资源节约程度在加强;治理前中游井泉灌区(如昌宁、环河灌区)、下游山水井泉混合灌区土冗余最多;治理后中游山水灌区(如杂木、金塔、金羊、张义、安远等灌区)和下游红崖山水库灌区土地在减少冗余度,说明关井压田对纯井灌区起到明显作用。综合来看,下游生态问题最严重的红崖山水库灌区治理难度最大。

石羊河流域重点治理的总体思路是本着先节水、后调水的原则,首先要立足于本流域的水资源,辅以适量的外流域调水。但由于水资源总量有限,加之调水工程大、耗资高,所以全面建设节水型社会就成了流域治理的根本性的重点措施。建设节水型社会,就是要建立以水权管理为核心的水资源管理制度体系、与水资源承载力相协调的经济结构体系、与水资源优化配置相适应的水利工程体系,提高水资源的利用效率和效益。建立完善"明晰水权、定额管理、节约有奖、转让有偿"的水资源管理体系,坚持控制灌溉面积与降低灌溉定额相

表 8 石羊河流域灌区治理措施

Table 8 Integrated management measures of irrigated areas in Shiyang River Basin (2006—2010)

灌区类型 Irrigated area type	灌区名称 Name of irrigated area	灌溉工程/km Irrigation project					田间工程/$10^4 hm^2$ Field-project			压缩面积/$10^4 hm^2$ Compressed farmland area		
		总干渠 Main channel	干渠 Canal	支渠 Branch canal	合计 Total	2006—2010 年间灌区节水改造渠道长度 Channel length of water saving reconstruction	管灌 Pipe irrigation	滴灌 Drip irrigation	合计 Total	2003 年农田灌溉面积 Farmland irrigated area/ $\times 10^4 hm^2$	农田灌溉配水面积 Area of irrigated water distribution of farmland	压缩面积 Compressed farmland area
山水灌区	西营灌区*	10.9	13.3	118.74	142.94	0.727	0.887	7.916	9.529	3	2.39	0.61
R-irrigated area	杂木灌区*	9.22	48.95	124.26	182.43	0.615	3.263	8.284	12.162	2.51	2.13	0.38
	黄羊灌区									1.98	1.69	0.29
	金塔灌区*	4	22	69.69	95.69	0.267	1.467	4.646	6.379	1.05	1.05	0
	张义灌区											
	古丰灌区									0.19	0.19	0
	古浪灌区									1.69	1.69	0
井泉灌区	永昌灌区									1.12	1.12	0
W-S irrigated area	清源灌区*									1.19	1.19	0
	金羊灌区*									0.82	0.82	0
	环河灌区*									0.52	0.27	0.26
	昌宁灌区*									0.61	0.15	0.46
山水井泉混合灌区' R-W-S irrigated area	红崖山水库灌区*	35.99	127.48	293.57	457.04	2.399	8.499	19.571	30.469	5.97	3.75	2.22

* 为重点治理灌区

结合,以降低定额为重点;渠系节水与田间节水相结合,以田间节水为重点;工程节水与管理节水相结合,管理优先;农业节水与综合节水相结合,推动流域全面节水。坚持控制灌溉面积与降低灌溉定额相结合,以降低定额为重点;渠系节水与田间节水相结合,以田间节水为重点;工程节水与管理节水相结合,管理优先;农业节水与综合节水相结合,推动流域全面节水。

灌区水资源的冗余率被看成是改进灌区技术和管理水平、提高用水效率的参照系,从计算结果来看,各灌区农业用水效率仍有较大的提升空间,而压缩农业用地、改造田间工程、实施节水灌溉是提升灌区用水效率的关键(表 8)。灌区的水资源在规划、输送、匹配、使用等各方面都存在很大的问题。今后,根据灌区治理进展情况,在适当的时候应对灌区水量分配方案进行调整,如何使有限的水资源发挥出更大的价值,还需要水利部门和设计工程师们在灌区渠系设计时,充分考虑每个灌区的自然禀赋和人文因素差异,做到使渠系建设的工程量最小、渠系利用率更高和灌区土地利用率更高,在完成更高的农业生产效率的同时水资源利用率维持在一个较高的水平,以利于整个灌区经济社会持续协调发展。

用水户是灌区水资源的直接利用者,其行为方式是决定用水效率的最基础、最关健因素。除了一系列制度外部性约束外,更主要的是从内部改变用水户的行为方式与习惯。2005 年,各灌区均以农户为基本单位进行田间灌溉,各自为政,导致水资源配置、节约用水的目标难以实现。2007 年,《武威市人民政府关于水权水市场建设的指导意见》《武威市农民用水者协会经营管理办法》《水票使用办法》等一系列制度出台后,将水资源配置与水权密切结合起来,充分发挥水价杠杆作用,规范水权转让行为,使水资源通过市场的有效调剂解决了供需矛盾,从而为节约用水、实现优化配置提供了保障。水票是用水户的水权凭证,由各用水户以组或用水户协会为单位统一到灌区水管单位购买使用,遵循总量控制、定额管理原则,这就打破了传统的各自为政的行为范式,而是将独立的农户通过市场机制和利益相关机制紧紧捆绑在一起。因此从 2007 年起,无论是农民用水协会数量、农民用水者协会管理的灌溉面积,还是灌区受益农户数量均持续增加,有力推动了灌区水效率的提升。尤其是流域治理的重点灌区(西营、杂木、红崖山、环河)提升更快,如西营灌区从 2006 年的 8 个增加到 2007 年的 69 个,红崖山水库灌区更是从 69 个增加到 245 个。受益农户数分别增加到 23636 户和 58899 户,但此后一直徘徊不前。因此通过各种措施鼓励农户加入用水者协会,建立利益共享、风险共担的机制,才能从根本上提高用水效率和效益。

参考文献(References):

[1] 耿献辉, 张晓恒, 宋玉兰. 农业灌溉用水效率及其影响因素实证分析——基于随机前沿生产函数和新疆棉农调研数据. 自然资源学报, 2014, 29(6): 934-943.

[2] 王录仓, 高静. 基于灌区尺度的聚落与水土资源空间耦合关系研究——以张掖绿洲为例. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1888-1901.

[3] Kopp R J. The measurement of productive efficiency: a reconsideration. The Quarterly Journal of Economics, 1981, 96(3): 477-503.

[4] 刘渝, 杜江, 张俊飚. 湖北省农业水资源利用效率评价. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(6): 60-65.

[5] 李世祥, 成金华, 吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 215-220.

[6] Hu J L, Wang S C, Yeh F Y. Total-factor water efficiency of regions in China. Resources Policy, 2006, 31(4): 217-230.

[7] Kifle M, Gebremicael T G, Girmay A, Gebremedihin T. Effect of surge flow and alternate irrigation on the irrigation efficiency and water productivity of onion in the semi-arid areas of North Ethiopia. Agricultural Water Management, 2017, 187: 69-76.

[8] Wu Y, Huang F Y, Jia Z K, Ren X L, Cai T. Response of soil water, temperature, and maize (*Zea may* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of Northwest China. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 113-121.

[9] Li T, Zhang J F. Effect of pit irrigation on soil water content, vigor, and water use efficiency within vineyards in extremely arid regions. Scientia Horticulturae, 2017, 218: 30-37.

[10] Medrano H, Tomás M, Martorell S, Escalona J M, Pou A, Fuentes S, Flexas J, Bota J. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 499-517.

[11] Gao X Y, Bai Y N, Huo Z L, Xu X, Huang G H, Xia Y H, Steenhuis T S. Deficit irrigation enhances contribution of shallow groundwater to crop water consumption in arid area. Agricultural Water Management, 2017, 185: 116-125.

[12] Du S Q, Kang S Z, Li F S, Du T S. Water use efficiency is improved by alternate partial root-zone irrigation of apple in arid Northwest China. Agricultural Water Management, 2017, 179: 184-192.

[13] Liu B, Guan H D, Zhao W Z, Yang Y T, Li S B. Groundwater facilitated water-use efficiency along a gradient of groundwater depth in arid

northwestern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 235-241.
[14] Onishi A, Sato Y, Watanabe T, Fukushima, Cao X, Imura H, Matsuoka M, Morisugi M. Study on sustainable agricultural production and agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin of China//Taniguchi M, Burnett W C, Fukushima Y, Haigh M, Umezawa Y, eds. From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management. Leiden, the Netherlands: CRC Press, 2009: 465-470.
[15] Christian-Smith J, Cooley H, Gleick P H. Potential water savings associated with agricultural water efficiency improvements: a case study of California, USA. Water Policy, 2012, 14(2): 194-213.
[16] Fuller B W. Surprising cooperation despite apparently irreconcilable differences: agricultural water use efficiency and CALFED. Environmental Science & Policy, 2009, 12(6): 663-673.
[17] McVicar T R, Zhang G L, Bradford A S, Wang H X, Dawes W R, Zhang L, Li L T. Monitoring regional agricultural water use efficiency for Hebei Province on the North China Plain. Australian Journal of Agricultural Research, 2002, 53(1): 55-76.
[18] Singh K. Rational pricing of water as an instrument of improving water use efficiency in the agricultural sector: a case study in Gujarat, India. International Journal of Water Resources Development, 2007, 23(4): 679-690.
[19] Waraich E A, Ahmad R, Ashraf M Y, Saifullah, Ahmad M. Improving agricultural water use efficiency by nutrient management in crop plants. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2011, 61(4): 291-304.
[20] Deng X P, Shan L, Zhang H P, Turner N C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/3): 23-40.
[21] Manneville V, Le Gall A, Dolle J B, Lucbert J. Efficiency of the plan for the control of the pollutions of agricultural origin in france for the recovery of the nitrate quality of waters. Fourrages, 2010, (204): 289-296.
[22] Wallace J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 82(1/3): 105-119.
[23] Liu B H, Chen X P, Meng Q F, Yang H S, Van Wart J. Estimating maize yield potential and yield gap with agro-climatic zones in China—Distinguish irrigated and rainfed conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 239: 108-117.
[24] Fan Y Q, Ding R S, Kang S Z, Hao X M, Du T S, Tong L, Li S E. Plastic mulch decreases available energy and evapotranspiration and improves yield and water use efficiency in an irrigated maize cropland. Agricultural Water Management, 2017, 179: 122-131.
[25] Merchán D, Causapé J, Abrahão R, García-Garizábal I. Assessment of a newly implemented irrigated area (Lerma Basin, Spain) over a 10-year period. I: water balances and irrigation performance. Agricultural Water Management, 2015, 158: 277-287.
[26] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 赵西宁, 刘静. 基于DEA的灌区生产效率分析——以江苏省为例. 排灌机械工程学报, 2014, 32(2): 173-178.
[27] 屈忠义, 杨晓, 黄永江, 杜斌, 杨俊林. 基于Horton分形的河套灌区渠系水利用效率分析. 农业工程学报, 2015, 31(13): 120-127.
[28] 刘静, 吴普特, 王玉宝, 赵西宁, 操信春, 孙世坤. 基于数据包络分析的河套灌区农业生产效率评价. 农业工程学报, 2014, 30(9): 110-118.
[29] 蒙吉军, 汪疆玮, 尤南山, 王雅, 周朕. 基于DEA的黑河中游灌区水资源配置效率时空分异. 水土保持研究, 2017, 24(1): 173-180, 2-2.
[30] 赵连阁, 王学渊. 农户灌溉用水的效率差异——基于甘肃、内蒙古两个典型灌区实地调查的比较分析. 农业经济问题, 2010, (3): 71-78, 111-111.
[31] 门洪文, 张秋, 代兴龙, 曹倩, 王成雨, 周晓虎, 贺明荣. 不同灌水模式对冬小麦籽粒产量和水、氮利用效率的影响. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2517-2523.
[32] 陈皓锐, 黄介生, 伍靖伟, 杨金忠. 井渠结合灌区用水效率指标尺度效应研究框架. 农业工程学报, 2009, 25(8): 1-7.
[33] 郎坤, 刘泉汝, 卞城月, 刘馨惠, 李全起. 推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田冠层温度与叶片水分利用效率的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5262-5268.
[34] 赵志成, 杨显贺, 李清明, 刘彬彬, 杨振超. 不同膜下滴灌方式对设施黄瓜生理特性及水分利用效率的影响. 生态学报, 2014, 34(22): 6597-6605.
[35] Liu H J, Wang X M, Zhang X, Zhang L W, Li Y, Huang G H. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China. Agricultural Water Management, 2017, 179: 144-157.
[36] Wang D B, Li F S, Nong ML. Response of yield and water use efficiency to different irrigation levels at different growth stages of Kenaf and crop water production function. Agricultural Water Management, 2017, 179: 177-183.
[37] Li Z Z, Sun Z H. Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the Corn Belt of Northeast China. European Journal of Agronomy, 2016, 75: 12-24.
[38] Tari A F. The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions. Agricultural Water Management, 2016, 167: 1-10.
[39] 武威市水务局:武威市水利统计年报(2000—2010年).